



HAL
open science

Approche monolithique pour la simulation numérique des procédés d'élaboration de matériaux composites par infusion

Maxime Blais, Nicolas Moulin, Julien Bruchon, Pierre-Jacques Liotier, Sylvain
Drapier

► **To cite this version:**

Maxime Blais, Nicolas Moulin, Julien Bruchon, Pierre-Jacques Liotier, Sylvain Drapier. Approche monolithique pour la simulation numérique des procédés d'élaboration de matériaux composites par infusion. 12e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01400461

HAL Id: hal-01400461

<https://hal.science/hal-01400461>

Submitted on 22 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Approche monolithique pour la simulation numérique des procédés d'élaboration de matériaux composites par infusion

M. Blais¹, N. Moulin¹, J. Bruchon¹, P.J. Liotier¹, S. Drapier¹

¹ LGF UMR CNRS 5307, École des Mines de Saint-Étienne,
CS 62362, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne cedex 2, France
{maxime.blais,nicolas.moulin,bruchon,liotier,drapier}@emse.fr

Résumé — Cette étude propose une approche numérique permettant de simuler les procédés de fabrication de pièces composites par infusion de résine dans un cadre industriel. Le modèle s'appuie sur une approche monolithique pour la résolution d'un couplage Stokes-Darcy, modélisant l'écoulement dans des milieux non poreux (canaux d'alimentations) et dans les préformes fibreuses. La déformation des préformes, importante dans ces procédés, est prise en compte au moyen d'une formulation lagrangienne réactualisée, au travers de lois de comportement identifiées expérimentalement et d'un modèle de Terzaghi.

Mots clés — Couplage Stokes-Darcy, stabilisation ASGS, procédés par infusion (LCM), Terzaghi.

1 Introduction

Les procédés de fabrication par voies humides sont actuellement en constant développement pour apporter des solutions plus économiques et optimisées (temps de cycles, taux volumiques de fibres, santé matière...) pour la réalisation de pièces en composites hautes performances de grandes dimensions. Les procédés visés correspondent aux procédés de type infusion de résine (LRI : Liquid Resin Infusion) ou les procédés par injection de résine assistés par le vide (de type VA-RTM : Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding). Ces procédés consistent à faire infuser une résine liquide à travers l'épaisseur de préformes, sous l'effet combiné d'une pression mécanique agissant sur l'empilement et d'une dépression dans le circuit de résine. Le mouvement est régi par la dépression imposée dans le moule, mais également par la nature (*i.e.* la perméabilité) des milieux imprégnés qui subissent de grandes transformations. L'écoulement de la résine peut être décomposé en deux étapes clés : (i) la résine s'écoule dans un tissu drainant très perméable pour créer un lit de résine en surface de l'empilement de renfort ; (ii) la résine infuse la préforme fibreuse, préférentiellement dans sa direction transverse. Dans le même temps, la préforme gonfle sous l'effet de la pression du fluide, ce qui modifie la géométrie mais également les taux volumiques de fibres et donc la distribution de perméabilité. On comprend bien alors qu'au delà de la simplicité apparente du procédé tel que représenté sur la Figure 1, celui-ci reste encore mal maîtrisé pour des pièces complexes. Ces procédés nécessitent le développement d'outils numériques adaptés et robustes pour être suffisamment représentatifs, voir prédictifs en termes de temps de cycles de fabrication mais également de qualité des pièces fabriquées (dimensions, taux de porosités).

L'objectif de ce travail est donc de proposer une stratégie numérique robuste basée sur une approche éléments finis, permettant la simulation de ces procédés, dans un cadre isotherme, sur des géométries et propriétés matériaux industrielles [1]. La qualité et la pertinence du modèle à prédire des temps de remplissage, dimensions ou taux volumiques de fibres nécessite l'utilisation d'un couplage fluide-solide. Le problème fluide, via un couplage Stokes-Darcy, permet de décrire l'écoulement de la résine dans le/les drainant(s) et dans les préformes fibreuses orthotropes très peu perméables (perméabilités mesurées de $10^{-15} m^2$ dans nos applications) assimilées ici à un milieu poreux. Le problème mécanique rend compte de la déformation du système sous l'influence couplée du chargement mécanique extérieur et intérieur (pression hydrostatique de la résine).

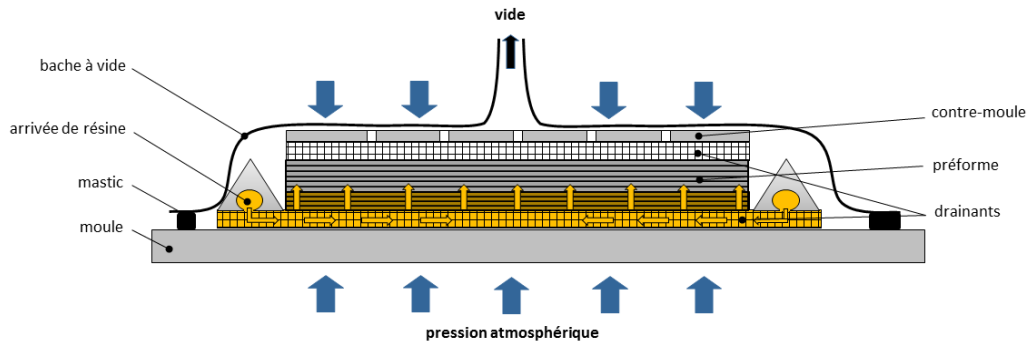


FIGURE 1 – Procédé de fabrication par infusion.

2 Problème fluide et gestion des interfaces mobiles

Cette étude s'appuie sur un couplage entre un modèle de Darcy (écoulement dans un milieu poreux homogène équivalent représentant les préformes) et un modèle de Stokes (modélisant l'écoulement dans le/les drainant(s) assimilés à des zones purement fluides). La résolution du système couplé s'appuie ici sur une approche monolithique permettant d'introduire naturellement un couplage fort entre les deux problèmes et l'utilisation d'un maillage unique non structuré [2, 3]. Le problème est formulé avec des éléments finis mixtes décrits par des champs linéaires en vitesse-pressure et stabilisés par une méthode multi-échelle dite "ASGS" (Algebraic SubGrid Scale) [4]. Afin de rendre compte du comportement fortement anisotrope des préformes fibreuses, une extension de la méthode de stabilisation a été développée pour le modèle de Darcy. Cette stabilisation est réalisée sur la base d'une décomposition des termes de stabilisation, introduisant des constantes de stabilisation indépendantes dans chacune des directions matérielles.

Les interfaces de ce problème (interfaces Stokes-Darcy et front de fluide) sont représentées et traitées séparément par des fonctions *level-set* classiques [5]. Le principe consiste à définir, en chaque nœud du maillage, une fonction représentant la distance de ce point à l'interface considérée. Appliquée à une interface mobile, cette fonction est calculée en résolvant une équation de convection pour laquelle le champ de vitesse est issu du problème fluide. Afin d'optimiser la stabilité et la qualité des résultats numériques du calcul fluide, les éléments du maillage traversés par une interface sont sous-découpés afin de rendre compte précisément de chacune des physiques du problème [6]. La reconstruction des éléments est réalisée de manière purement géométrique (Figure 2) afin d'enrichir les éléments concernés avec de nouvelles règles d'intégration, sans modifier le nombre d'inconnues du problème.

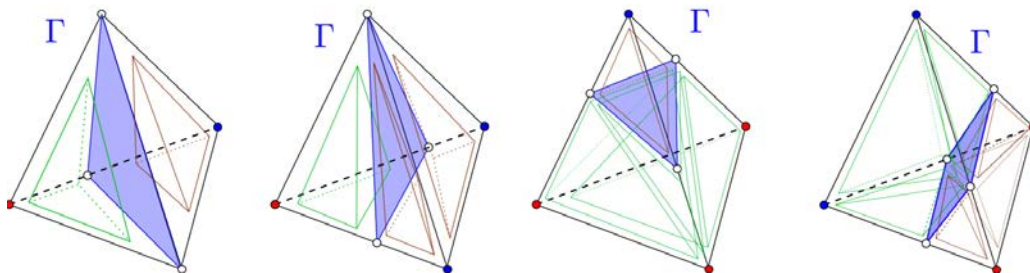


FIGURE 2 – Sous-découpage d'un élément tétraédrique traversé par une interface Γ décrite par l'iso-zéro d'une fonction *level-set*.

3 Déformations mécaniques

Au cours du procédé, les préformes sont soumises à de grandes déformations mécaniques liées à la compaction des préformes sous l'action du vide entre le demi-moule et la bache (Figure 1), mais

également à un gonflement de la préforme lié à la pression hydrostatique de la résine. Il a été montré sur des cas simples [7] que la prise en compte des grandes déformations permettrait de prévoir correctement les temps de remplissage et les dimensions finales. Les grandes déformations de la préforme sont prises en compte au moyen d'une formulation lagrangienne réactualisée. La réponse mécanique des préformes étant très complexe, leur comportement transverse est ici décrit par un modèle orthotrope élastique non-linéaire caractérisé expérimentalement. La présence de la résine dans les préformes humides (considérées comme imprégnées) est décrite par un modèle de Terzaghi [8] :

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_{eff} - sp\mathbf{I} \quad (1)$$

où $\boldsymbol{\sigma}$ correspond aux contraintes dans les préformes, $\boldsymbol{\sigma}_{eff}$ les contraintes effectives (c'est-à-dire les contraintes en l'absence de résine), s la saturation du milieu prise égale à 0 ou 1 dans nos calculs, p correspond à la pression hydrostatique de la résine et enfin \mathbf{I} le tenseur identité.

Ce modèle nécessite d'effectuer un couplage entre l'écoulement de la résine et la compression des préformes puisqu'il faut d'abord calculer la pression de la résine pour ensuite l'utiliser au niveau de la loi de comportement des préformes humides. La modélisation du problème mécanique permet de rendre compte dans le procédé, non seulement de l'évolution des dimensions de la pièce, mais également de l'évolution de la porosité et de la perméabilité des préformes, qui sont alors réactualisées au cours de la résolution du problème fluide.

4 Applications

Les outils présentés montrent actuellement leur pertinence et leur robustesse sur des applications aéronautiques complexes, tel qu'un panneau auto-raïdi (Figure 3) caractérisé par de fortes variations d'épaisseurs et de courbures. La simulation présentée a été réalisée en considérant un drainant de 1mm d'épaisseur ainsi qu'une perméabilité orthotrope de l'ordre de $10^{-15}m^2$ dans la direction transverse (direction X_T) et 10 fois plus faible dans le plan. Des confrontations expérimentales sont en cours pour évaluer les capacités de ces modèles à prédire les temps d'infusion et à anticiper les problèmes d'imprégnation (zones sèches) qui peuvent être observés industriellement.

Références

- [1] Pierre Celle, Sylvain Drapier, and Jean-Michel Bergheau. Numerical modelling of liquid infusion into fibrous media undergoing compaction. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 27(4) :647–661, 2008.
- [2] L. Abouorm, R. Troian, S. Drapier, J. Bruchon, and N. Moulin. Stokes–darcy coupling in severe regimes using multiscale stabilisation for mixed finite elements : monolithic approach versus decoupled approach. *European Journal of Computational Mechanics*, 23(3-4) :113–137, 2014.
- [3] G. Pacquaut, J. Bruchon, N. Moulin, and S. Drapier. Combining a level-set method and a mixed stabilized P1/P1 formulation for coupling Stokes-Darcy flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 69(2) :459–480, 2012.
- [4] Santiago Badia and Ramon Codina. Unified Stabilized Finite Element Formulations for the Stokes and the Darcy Problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 47(3) :1971–2000, 2009.
- [5] Y.C. Chang, T.Y. Hou, B. Merriman, and S. Osher. A Level Set Formulation of Eulerian Interface Capturing Methods for Incompressible Fluid Flows. *Journal of Computational Physics*, 124(2) :449–464, 1996.
- [6] H. Coppola-Owen and Ramon Codina. A free surface finite element model for low Froude number mould filling problems on fixed meshes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 66(7) :833–851, 2011.
- [7] Peng Wang, Sylvain Drapier, Jérôme Molimard, Alain Vautrin, and Jean-Christophe Minni. Characterization of Liquid Resin Infusion (LRI) filling by fringe pattern projection and in situ thermocouples. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 41(1) :36–44, 2010.
- [8] K. Terzaghi. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons., 1996.

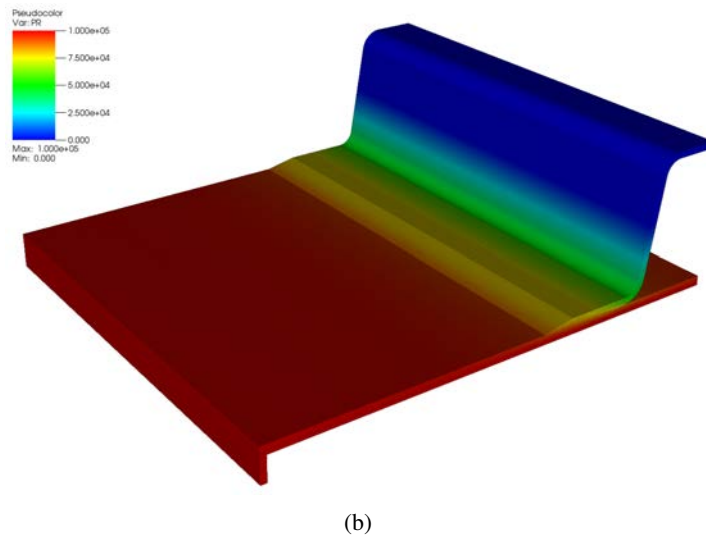
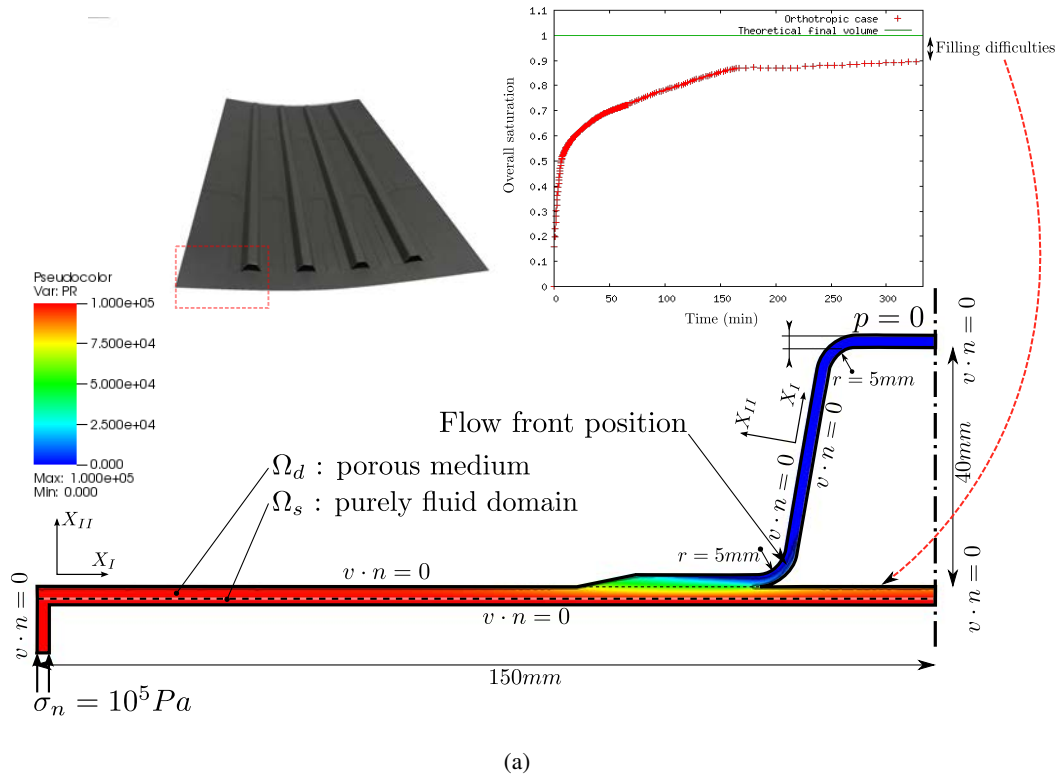


FIGURE 3 – Champ de pression pendant l’infusion d’un panneau auto-raidi industriel en 2D (a) et 3D (b).